

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний.
2. ГОСТ 8736-93. Песок для строительных работ. Технические условия.
3. ГОСТ 10060.2-95. Бетоны. Ускоренные методы контроля морозостойкости.
4. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности.
5. ГОСТ 13087-81. Бетоны. Метод определения истираемости.
6. ГОСТ 12730.5-84. Бетоны. Методы определения водопоглощения.

**Панченко А.И.**

### **СОБСТВЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА**

На всех уровнях структуры бетона начиная с момента его укладки имеют место собственные деформации и, как следствие, формирование поля собственных напряжений. Под собственными понимаются деформации и напряжения в структуре материала, возникающие без применения какого-либо внешнего механического воздействия. Их причиной являются силы, возникающие под влиянием физико-химических процессов в структуре материала и при его взаимодействии с внешней средой.

Сложность явления собственных деформаций обусловлена, с одной стороны, многогранностью причин и различием вариантов их сочетания, с другой стороны, различием как абсолютных значений деформаций, вызванных разными причинами, так и их направленностью (сжатие-расширение). Безусловно, деформации элементов структуры, обладающей сколько-нибудь значительной жесткостью (начиная с момента схватывания бетона), неразрывно связаны с возникающими напряжениями на различных уровнях структуры. Расчет или экспериментальное определение величин возникающих напряжений весьма осложнены тем, что структура бетона гетерогенна и состоит, по крайней мере, из 6 - 8 фаз от коллоидных размеров до десятков миллиметров, имеющих различные физико-химические свойства, деформативные и другие механические характеристики. Вместе с тем, знание характера возникающих деформаций и напряжений позволит в существенной мере управлять процессом структурообразования бетона, обеспечивая его возможно меньшую дефектность к моменту начала эксплуатации конструкции. Кинетика собственных деформаций и формирующееся поле структурных напряжений могут существенно влиять на долговечность бетона. Если напряжение, возникающее от эксплуатационных и, в частности, циклических физических воздействий будут совпадать по знаку с собственными напряжениями, бетон будет обладать меньшей долговечностью по сравнению с бетоном, в котором собственные напряжения либо отсутствуют (что возможно лишь теоретически), либо имеют противоположный знак. Повышение стойкости бетона к воздействиям внешней среды, таким образом, возможно на основе знания кинетики, а также природы собственных деформаций и характера возникающего поля собственных напряжений, умения управлять этим процессом с целью снижения дефектности структуры бетона перед началом его эксплуатации. Способы управления или регулирования процессами собственных деформаций, безусловно, будут зависеть от причин, их вызывающих. В этой связи предлагается рассматривать два вида собственных деформаций: безусловные и вынужденные (рис. 1).

Собственные безусловные - это деформации, которые являются неотъемлемой частью физических, физико-химических и химических процессов, лежащих в основе

формирования структуры сначала бетонной смеси (с момента затворения водой и до схватывания), а затем бетона, вплоть до окончания взаимодействия цемента с водой и добавками, введенными в состав бетона при его приготовлении. Эти деформации обусловлены следующими причинами:

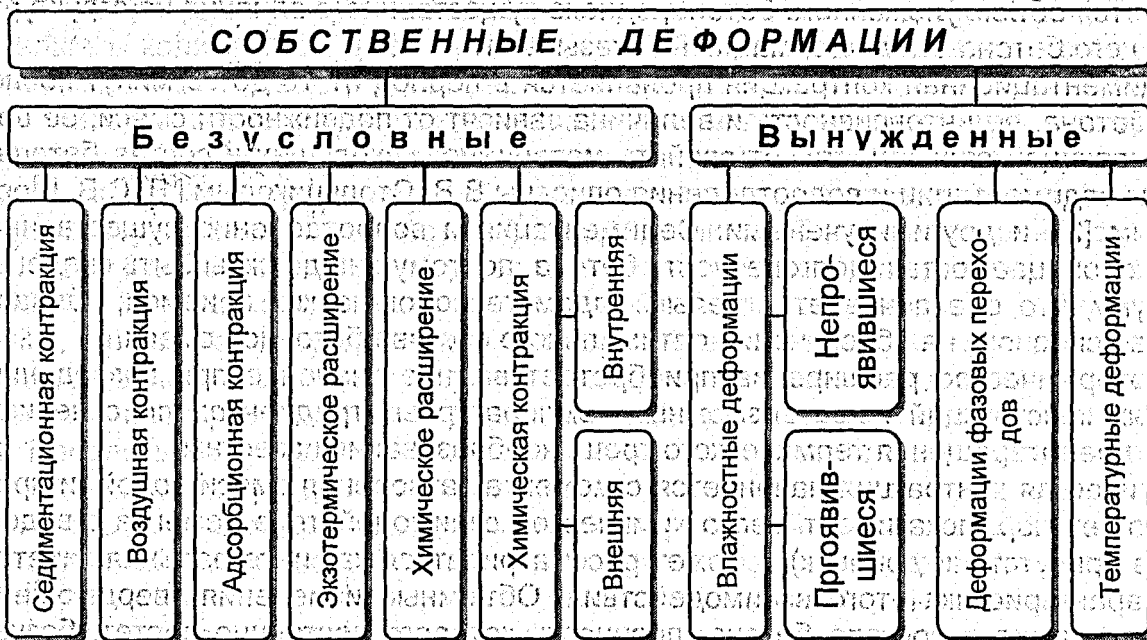


Рис. 1. Классификация собственных деформаций бетона

1. Смачивание поверхности частиц и поглощение воды их открытыми порами с повышением плотности адсорбированной воды - адсорбционная контракция. По данным различных авторов плотность слоев адсорбированной воды достигает  $1,4-2,0 \text{ г/см}^3$ .
  2. Удаление части воздуха, адсорбированного на поверхности твердых частиц - компонентов бетонной смеси - воздушная контракция.
  3. Седиментация частиц бетонной смеси - седиментационная контракция.
  4. Экзотермия цемента и связанное с этим изменение температуры твердеющего бетона - экзотермическое расширение.
  5. Различие плотностей исходных и конечных продуктов химических реакций - химическая контракция (внешняя и внутренняя).
  6. Особенности морфологии некоторых образующихся кристаллогидратов, а так же комплексных соединений и их сростков - химическое расширение.
- Деформации, являющиеся следствием описанных причин, отнесены к собственным безусловным, так как они будут проявляться при приготовлении и твердении любого бетона, независимо от вида использованного минерального вяжущего. Однако их величина и интенсивность будут зависеть, в основном, от состава бетона, вида, минералогии и тонкости помола вяжущего, наличия добавок и других факторов, назначаемых на стадии проектирования состава бетона. Условия твердения и эксплуатации оказывают влияние на собственные безусловные деформации в той степени, в которой они влияют на кинетику твердения отдельных минералов цемента и бетона в целом.
- Таким образом, собственные безусловные деформации влияют на формирование поля собственных напряжений, на характер поровой структуры и уровень де-

фектности бетона в процессе его твердения. Степень влияния каждого из указанных выше видов собственных деформаций различна и, в целом, заключается в следующем:

Воздушная и адсорбционная контракция завершается в основном по окончании процессов перемешивания и уплотнения бетона, в результате чего несколько уменьшается объем уложенного бетона, однако существенного влияния на структуру твердеющего бетона эти деформации не оказывают.

Седиментационная контракция проявляется в период от 10 до 90 минут после укладки бетона, ее интенсивность и величина зависят от подвижности смеси, ее водоудерживающей способности, от свойств материалов, входящих в состав бетона. Процессы седиментации и водоотделения описаны В.В. Стольниковым [1], С.В. Шестоперовым [2], и другими учеными. Седиментация и водоотделение существенно снижают проницаемость и долговечность бетона, поэтому они должны быть сведены к минимуму, что обеспечивается целым рядом технологических приемов, направленных, в основном, на обеспечение оптимального состава бетонной смеси.

Экзотермическое расширение приобретает важное значение при возведении массивных конструкций из-за возможных температурных градиентов по сечению. Способы предотвращения термического трещинообразования известны.

Химическая контракция начинается с момента затворения смеси водой и протекает до тех пор, пока имеет место химическое взаимодействие цемента с водой (иногда в присутствии добавок) и может рассматриваться как интегральная кинетическая характеристика этого взаимодействия. Объемные изменения твердеющего цементного камня в составе бетона, прочность которого постоянно растет, безусловно оказывают влияние на процесс формирования его структуры и развития собственных напряжений. В настоящее время принято считать, что химическая контракция наиболее интенсивно развивается, когда цементный камень обладает определенной прочностью структуры, что обеспечивает неизменность его внешнего объема с образованием мельчайших пор (контракционных), равномерно распределенных внутри объема твердеющего цементного камня [2, 3, 4]. Указанные авторы, а также и многие другие непременно подчеркивают, что химическая контракция не влияет на общий объем цементного камня.

Однако этот процесс более сложен и требует специального рассмотрения. Исследования процесса химической контракции, к сожалению, немногочисленны и основаны на использовании методики, позволяющей измерять лишь объем образующейся контракционной пористости. Между тем, химическая контракция, как было доказано экспериментально [5], не только является причиной образования контракционной пористости, но и приводит к уменьшению внешнего объема твердеющего цемента, что и послужило основанием для разделения химической контракции на внутреннюю и внешнюю. Такое разделение весьма важно из-за принципиально разного их влияния на формирование структуры бетона. Если увеличение контракционной пористости из-за более глубокой гидратации может положительно сказаться на долговечности, то внешняя контракция, как показали наши исследования [5, 11], приводит к микротрещинообразованию в цементной матрице и нарушает сцепление цементного камня с заполнителем и, как следствие, существенно снижает долговечность бетона.

Химическое расширение обусловлено особенностями образования и кристаллизации гидросульфоалюминатов и гидросульфоферритов кальция из алюминатов и ферритов кальция и гипса, входящих в состав цемента или использованных в качестве добавок к нему. Сегодня, к сожалению, нет единой точки зрения, описывающей механизм химического расширения, хотя имеется большое число гипотез по этому

поводу. Вместе с тем, именно такой механизм является основой для разработки надежных способов управления процессом химического расширения и направленного регулирования структурообразования бетона. Теоретический подход и его экспериментальное обоснование изложен в [6, 7]. В этой связи особую важность приобретает проблема оптимального сочетания процессов контракции и химического расширения и разработка критериев и способов получения бездефектной (или с минимальным количеством дефектов) структуры бетона, что обеспечит его повышенную стойкость к циклическим атмосферным воздействиям.

Второй вид собственных деформаций назван вынужденными потому, что эти деформации, хотя и являются собственными, так как проявляются без приложения механической нагрузки, могут иметь место только при определенном (как правило, температурном или влажностном) воздействии на бетон со стороны окружающей среды. Так, бетон, находящийся при нормальной температуре и повышенной (95..100 %) влажности, может не иметь собственных вынужденных деформаций. Однако, в реальной ситуации такие условия бывают крайне редко, поэтому любой бетон в период его эксплуатации, а иногда и до момента достижения проектных свойств, претерпевает этот вид деформаций, причинами которых являются:

1. Процессы внутреннего массопереноса и массообмена бетона с окружающей средой: влажностная усадка или набухание.
2. Фазовые превращения под влиянием окружающей среды: льдообразование, кристаллизация и перекристаллизация, растворение - деформации фазовых переходов.
3. Изменение температуры среды - температурные деформации.

Проблеме влажностной усадки посвящено большое количество исследований, выполненных на протяжении последних более, чем пятидесяти лет [3, 8, 9]. Накоплен большой объем экспериментального материала, предложены механизмы развития влажностной усадки, на основе которых разработаны методы снижения усадочных деформаций.

По мнению А.Е. Шейкина [3], разделяющего деформации влажностной усадки на свободные (без фиксации материала, как по всему его объему, так и отдельным его частям), проявившиеся и не проявившиеся, усадочные напряжения. По нашему мнению бетон не может иметь свободных деформаций влажностной усадки из-за неоднородности своей структуры, т.к. заполнитель, не имеющий влажностной усадки, сдерживает деформации цементного камня. Бетон, находящийся в свободных условиях, т.е. без фиксации его объема, будет иметь проявившиеся и не проявившиеся деформации усадки. Вторые являются причиной возникновения микроструктурных напряжений, образования внутренних усадочных микротрещин, и снижения стойкости бетона к циклическим атмосферным воздействиям. Величина этих напряжений, количество трещин, а значит и степень снижения стойкости бетона находится в прямой зависимости от технологических факторов (состава бетона, вида вяжущего, наличия добавок и др.) и не зависит от вида, формы и размеров конструкции. Поэтому наиболее важными, с точки зрения обеспечения высокой стойкости бетона к атмосферным воздействиям, и, в первую очередь замораживанию и оттаиванию, являются не проявившиеся усадочные деформации.

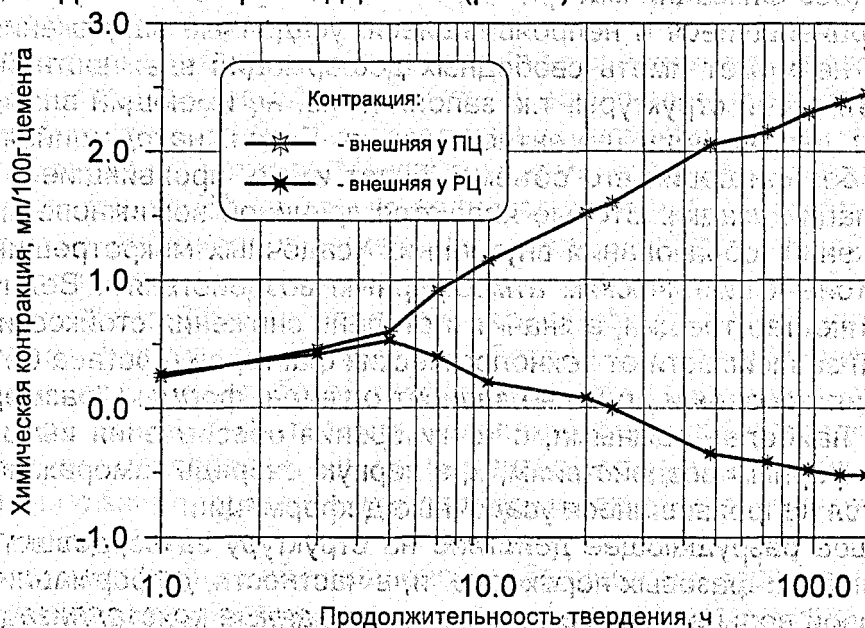
Наибольшее разрушающее действие на структуру затвердевшего бетона оказывают деформации фазовых переходов и, в частности, деформации при фазовом переходе поровой воды в лёд. Деформации, вызванные кристаллизацией или перекристаллизацией гидратов и комплексных соединений в затвердевшем бетоне относятся к видам химического воздействия, например, сульфатная и щелочная коррозия. Вместе с тем, по мнению автора, эти два вида деформаций фазового перехода,

хотя и обусловлены различными причинами, имеют много общего в механизмах разрушения бетона. Поэтому многие результаты исследования процесса морозного разрушения целесообразно использовать и в анализе механизма разрушения бетона вследствие, например, сульфатной коррозии. В этой связи подход к разрушению бетона и оценке его долговечности с позиций механики разрушения [6, 10] имеет существенные преимущества.

Температурные деформации при атмосферном воздействии, как правило, являются одной из составляющих собственных вынужденных деформаций бетона, так как при изменении температуры изменяется и влажность бетона, а значит и влажностные деформации, а при достижении 0°C и ниже появляются деформации вследствие фазового перехода воды в лёд. Как и в случае с влажностной усадкой, возможное разрыхление структуры бетона из-за внутреннего микротрещинообразования является следствием непроявившихся температурных деформаций из-за различия коэффициентов температурного расширения компонентов бетона.

Таким образом, вынужденные собственные деформации и связанные с ними внутренние напряжения развиваются в бетоне, структура которого была сформирована под влиянием собственных безусловных деформаций и напряжений. Из этого следует, что результирующие величины собственных деформаций и связанных с ними внутренних напряжений должны определяться путем последовательного рассмотрения этих двух видов собственных деформаций и наложением напряжений, возникающих от вынужденных деформаций на поле напряжений, вызванное, имевшими место ранее, собственными безусловными деформациями.

Очевидно, что для ограничения образования дефектов в структуре бетона от его непроявившихся собственных деформаций, необходимо, чтобы величина собственных растягивающих напряжений не превышала прочность на растяжение матрицы или прочность ее сцепления с зернами заполнителя. Как показали исследования, проведенные по специально разработанной для этой цели методике [5] на этапе развития химической контракции этого можно добиться путем компенсации внешней химической контракции химическим расширением сульфоалюминатной расширяющей добавки, введенной в портландцемент (рис. 2).



**Рис. 2.** Влияние расширяющей добавки на внешнюю химическую контракцию. ПЦ — портландцемент; РЦ — то же с расширяющей добавкой

Компенсация объемных изменений матрицы от влажностной усадки за счет химического расширения невозможна, так как развитие этих процессов не совпадает по времени. Снижение величин растягивающих напряжений возможно, если в местах их ожидаемых максимальных значений перед началом процесса влажностной усадки структура бетона будет находиться под влиянием сжимающих напряжений. В этом случае будет реализован эффект, подобный эффекту предварительного натяжения арматуры в железобетонных конструкциях. Возможно ли это по отношению к структуре бетона? Ответ на этот вопрос был получен в результате сравнительных испытаний бетонов на портландцементе (ПЦ) и на ПЦ с расширяющейся добавкой (ПЦ+РД).

Для испытаний использовались образцы 28-суточного возраста. Проявление деформаций влажностной усадки обеспечивалось хранением бетонов в климатической камере с пониженной до 50..60 % влажностью при температуре 30°C до стабилизации размеров образцов. Свойства тяжелого бетона на фракционированном гранитном щебне крупностью до 10 мм с расходом цемента 370 кг/м<sup>3</sup> до замораживания и после 15 циклов замораживания в солевом растворе с 5 % NaCl при -50°C приведены в табл. 1.

Снижение прочности при сжатии до 95 % у бетона на ПЦ произошло после 5 циклов, а у бетона на ПЦ после 11 циклов. Это соответствует маркам по морозостойкости F200 и F400, то есть присутствие расширяющей добавки в оптимальном количестве удвоило морозостойкость тяжелого бетона. После 15-го цикла обычный бетон по сравнению с бетоном на ПЦ имел много большие изменения свойств, свидетельствующие о существенных нарушениях в его структуре.

Таблица 1

Влияние замораживания-оттаивания в солевом растворе

на свойства обычного бетона и бетона с расширяющей добавкой

Вид вяжущего	Перед замораживанием				После 15 циклов при -50°C			
	$\varepsilon_{sn}$ , %	$\varepsilon_c$ , %	$R_c$ , МПа	$E_g$ , МПа·10 <sup>3</sup>	$\varepsilon_{ост}$ , %	$R_c$ , МПа	$E_g$ , МПа·10 <sup>3</sup>	
ПЦ	0,038	0,02	52,6	43,18	0,49	20,5/39	14,52/58	
ПЦ+РД	0,051	0,049	60,8	43,74	0,15	49,8/82	39,8/91	

Примечание: в таблице приняты обозначения:  $\varepsilon_{sn}$  – проявившаяся влажностная усадка;  $\varepsilon_c$  – расширение в процессе водонасыщения в течение 96 часов;  $R_c$  – прочность при сжатии;  $E_g$  – динамический модуль упругости;  $\varepsilon_{ост}$  – остаточные (после замораживания) деформации.

Кроме замораживания-оттаивания оба бетона были подвергнуты испытаниям при попеременном водонасыщении, нагревании до 70°C с одновременным высушиванием и остыванием до 20°C. Нагревание и высушивание осуществлялось в вакуум-сушильном шкафу. После 70 циклов коэффициент стойкости (отношение прочности после испытаний к прочности на момент их начала)  $K_{cm}$  составил: для бетона на ПЦ –  $K_{cm} = 0,94$ , для бетона на ПЦ –  $K_{cm} = 1,12$ . Очевидно, повышение стойкости бетона с расширяющей добавкой произошло вследствие изменения характера поля собственных напряжений в его структуре перед началом испытаний.

Расчет величин собственных растягивающих напряжений в бетоне, выполненный на структурной модели [11] с использованием данных измерения внешней контракции, указывает на возможность образования радиальных микротрещин в теле цементного камня в местах наибольшего сближения ядер заполнителя и тангенци-

альных - на контакте с заполнителем, особенно в начальный период твердения. Управление процессом внешней контракции, а также частичная компенсация деформаций влажностной усадки с целью снижения дефектности структуры бетона обеспечивается оптимальным сочетанием процессов химической контракции и химического расширения путем введения минеральной сульфоалюминатной расширяющей добавки в портландцемент в необходимом количестве или использованием расширяющегося или напрягающего цементов с малой энергией расширения.

Как показали исследования, для обеспечения морозостойкости бетона, подверженного усадочным деформациям, на уровне марочной необходимо обеспечивать величину удельной усадки (проявившейся усадки, приходящейся на единицу массы цемента в бетоне) на уровне, не превышающем  $0,7 \times 10^{-5}$  на 1 кг цемента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону - М.: Госэнергоиздат, 1962. - с.47-53.
2. Шестоперов С.В. Долговечность бетона. - М.: Транспорт. 1966. - 499с.
3. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. - М.: Стройиздат. 1979. - 344с.
4. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. - М.: Стройиздат, 1965. - 215с.
5. Panchenko A. I. Frost Resistance and Other Properties of Concrete with Expansive Additives. // *ibausil*, b.2, 1997, pp. 269-276.
6. Panchenko A.I. Hardening of Ordinary and Expansive Cement with Silica Fume Admixture. // 9-th Int. Congress on Chemistry of Cement. - New Delhi, vol.IV, 1992. - pp 646-650.
7. Панченко А. И. Механизм расширения цементов сульфоалюминатного типа. // II Межд. Совец. по химии и технологии цемента. - М., 2000, -с. 95-99
8. Десов А.Е., Красильников К.Г., Цилюсани З.Н. Некоторые вопросы усадки бетона. // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. - М., 1976.
9. Bernal J., Jeffery J., Taylor H.F.W. Magazine of Concrete Research. 1952, No.11, 47.
10. Панченко А. И. Критерии оценки долговечности бетона. // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. - Ростов-на-Дону, 2000. - с. 277-284.
11. Panchenko A. I. Eigene Deformationen und Dauerhaftigkeit von Beton. // *ibausil*, b.2, 2000, ss. 689-698/

**Пирадов К.А., Мамаев Т.Л.**

### **МЕТОДИКА ПОДБОРА СОСТАВА БЕТОНА ПО ПАРАМЕТРАМ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ**

В исследованиях по прогнозированию долговечности решаются 2 основные задачи:

- 1) подбор составов бетона, обеспечивающих требуемую долговечность бетона проектируемых конструкций;
- 2) определить остаточный ресурс долговечности бетона существующих конструкций.

Решение первой задачи в настоящее время осуществляется на основе эмпирического подхода к подбору состава бетона по параметру его прочности на сжатие.